第9卷 第4期 动物学研究 Vol 9.,No.4
1988年11月 ZOOLOGICA RESEARCH Nov.,1988

树鼩脑三维结构重建的研究
Ⅲ.脑外形立体结构的计算机辅助绘图

汪多江* 孙公铎** 李绪明***

摘 要

作者曾经详细介绍过树鼩脑切片二维结构重建的数据采集、计算机处理数据的算法及图形生成技术。在此基础上，本文介绍树鼩脑三维结构重建的数学模型及其自动生成三维图形的基本技术与计算机绘图的部分结果。

关键词；树鼩，脑三维结构重建，计算机

问题的提出

脑三维结构重建目标的实现，有赖于计算机技术的发展。据文献记载，三维结构重建的先驱性工作始于六十年代末、七十年代初，首先由美国的 Levinthal 等实现的。可是，该技术因当时计算机设备昂贵而未能全面推广。到八十年代前后，美、法一些实验室对技术进行了简化与改进，使该技术推广成为可能。有关脑三维结构的重建研究乃是近年之事。1975年，R．W，Ware报告了组织切片的三维重建方法；1980年，Stevens，J．K报告了电镜切片的三维重建。大鼠兰斑核的三维重建由Foote，S．L（1980）获得成功；1982年，R，Lydic从比较解剖学角度，重建了五种动物的视交叉上核。在我国，这项研究工作近年开始有简单报道，例如，许鹿希利用国外技术报告了间脑核团的研究结果；上海生理所陈俊强报道了有关鱼视网膜水平细胞的定量研究结果。这里应当指出，上述工作为我国开展三维结构重建的研究作出了良好的开端；但作为现代计算机技术的应用研究，三维结构的重建现在仍有许多理论及实践问题，值得进一步探讨。

我们协作组近年在对树鼩进行行为和电生理研究的同时，从1983年开始着手树鼩脑三维结构的重建工作；研究先后沿两个方向进行，即用传统的神经解剖学手段，辅以绘

* 贵州省国营云马机械厂计算机数控中心
** 南京农业大学兽医系家畜生理研究室
*** 贵阳医学院生理学教研室脑与行为研究组
本文1986年11月21日收到，1987年10月15日修回。

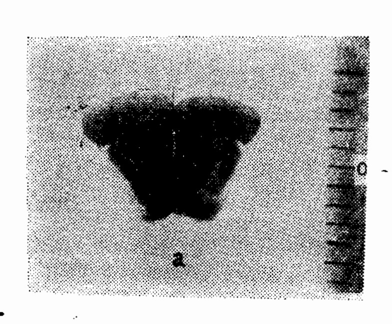
图技术进行重建；同时又采用电子计算机辅助重建与计算机绘图。

作者曾经详细报道的利用国产DJS—21电子计算机，对脑切片二维图象进行图形复制的基本技术，是三维重建的基础。在此基础上，本文报告了树鼩脑外形三维结构的计算机重建的基本技术和计算机绘图的部分结果。

随机数据结构的建立

作者曾经在报道中已经详细介绍了树鼩脑切片数据的收集方法：用10%的福尔马林固定麻醉致死的树鼩头，制成1.0mm厚的切片，然后再用Mullingan氏法染色，制成放大5倍的高反差照片。

图1（a）示出按照该方法制成的第一切片的照片，（b）示出第八切片的照片。



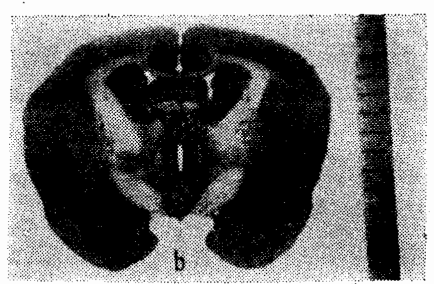


图1 树鼩脑切片照片

Fig. 1 The coronary sections of the tupaia belongeri chinensis.

根据照片上示出的脑外形轮廓曲线的曲率变化的均匀程度，用针在需取点处穿上小孔作为标记，然后在坐标仪上依次测量其点的x、y坐标值；将切片厚度方向作为z坐标。本文所述的是其中16个连续切片的坐标数据作为计算机三维重建的原始输入数据。这种数据形式称为随机数据结构。

随机数据结构的优化

随机数据结构以反映树鼩脑外形生理形状特征为出发点；人们往往以为取点越密，越可精确表示细微形状特征，重建三维结构也越逼真。作者试验结果表明并非如此，必须优化随机数据结构。

为了建立外形数学模型，现将树鼩脑外形表面作为双参数矢函数表示的三维空间曲面来处理，而该三维曲面是二维网格的矢值映射，则要求在与规则矩形网格拓朴等价的规则网格上设置坐标数据结构。

首先对各切片的坐标数据进行二维优化。设切片原始数据为$\{\vec{P}_i\}_{i=1,2,\cdots,n}$，由该数据所构成的曲线方程为$\vec{R}_i(t)$，则曲线分段表达式为

$$\vec{R}_i(t)=\vec{R}_i(o)+\vec{A}_i f(t)+\vec{B}_i g(t)+\vec{C}_i k(t)\quad (i=1,2,\cdots,n-1)\qquad(1)$$

式中，混合函数$\begin{cases}f(t)=t^2(3-2t)\\ g(t)=t(t-1)^2\\ k(t)=t^2(t-1)\end{cases}$，　　$(0\leqslant t\leqslant 1)$

$\vec{A}_i$为弦矢量；$\vec{B}_i$、$\vec{C}_i$为各段首末点处曲线的切矢量；令k_i为相邻弦矢量的比值，则

$$\vec{C}_i=k_i\vec{B}_{i+1}\qquad(2)$$

由式（1）、（2）得

$$\vec{B}_i+2k_i(1+k_i)\vec{B}_{i+1}+k_j^2k_{i+1}\vec{B}_{i+2}=3(\vec{A}_i+k_j^2\vec{A}_{i+1})\quad(i=1,2,\cdots,n-2)\qquad(3)$$

式（3）表明，方程组仅有（n－2）个方程，要解出n个$\vec{B}_i$尚缺少两个条件，通常补充两个端点条件来解决。假设各段曲线的弧长与其弦长相差不大时，采用参数曲率的平方沿曲线积分关于$\vec{B}_i$最小的原理求解方程组。设目标函数为

$$I=\sum_{i=1}^{n-1}\int_0^1\frac{1}{\rho_i^2}dt\approx\sum_{i=1}^{n-1}\int_0^1\vec{R}''^2_i\,dt\qquad(4)$$

不难得出

$$I=\sum_{i=1}^{n-1}\left[\vec{B}_i^2+k_i\vec{B}_i\vec{B}_{i+1}+k_i^2\vec{B}_{i+1}^2-3\vec{A}_i(\vec{B}_i+k_i\vec{B}_{i+1})\right]\qquad(5)$$

设$\vec{B}_1$、$\vec{B}_n$为自由参变量，则$\vec{B}_i$由方程组（3）用追赶法，可写为

$$\vec{B}_i=\vec{B}_i(\vec{B}_1,\vec{B}_n)\qquad(6)$$

故，目标函数亦可写为

$$I=I(\vec{B}_1,\vec{B}_n)\qquad(7)$$

要使I达到极小，只须

$$\frac{\partial I}{\partial\vec{B}_1}=\frac{\partial I}{\partial\vec{B}_n}=0\qquad(8)$$

则方程组（3）可解。

再用辛普生（Simpson）积分公式算出弧长，以此弧长为参数进行样条（Spline）插值，实现随机数据的优化，控制相邻间隔比为1/3～3，且使各对应切片点数趋于一致。左脑外形在1至16切片的随机数据点数依次为：21、36、35、27、27、38、38、50、40、46、53、51、30、30、35、39。可见各切片坐标点数相差较大。再分析切片二维坐标点的位置分布，发现相邻间隔比为1/15～25，极不均匀。首先进行二维优化。在二维优化的基础上，进行三维优化，其模型公式：

$$U=\frac{1}{2}\sum_{i=0}^{n}C_i(\vec{P}_i-\vec{Q}_i)^2+\frac{1}{2}EI\int\frac{1}{\rho^2}ds\qquad(9)$$

式中，$\vec{Q}_i$为优化前的点矢量；$\vec{P}_i$为优化后的位置矢量；C_i为权常数；EI为权常数；$1/\rho$为曲率；ds为曲线元。

到此为止，作完了随机数据结构的优化工作，图2示出了优化后左半脑的正投影图。

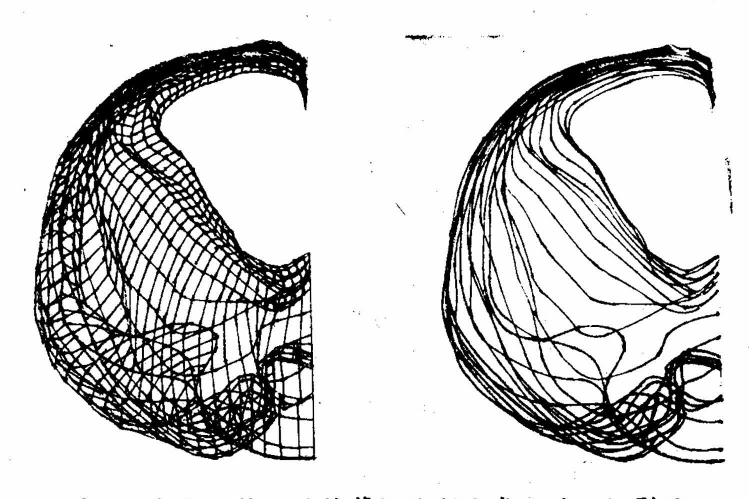


图2 数据预处理后计算机绘制左半脑的正投影图

Fig. 2 The orithographs of the brain made after pretreatment data by CAG.

正投影图表现出可度量性，可比较优化后的数据与切片轮廓线的逼近程度。实践表明，本文所述的优化方法是成功的，其逼近效果令人满意。为了表现出图形的直观性，透视图是十分有效的，图3示出了左半脑的透视图。

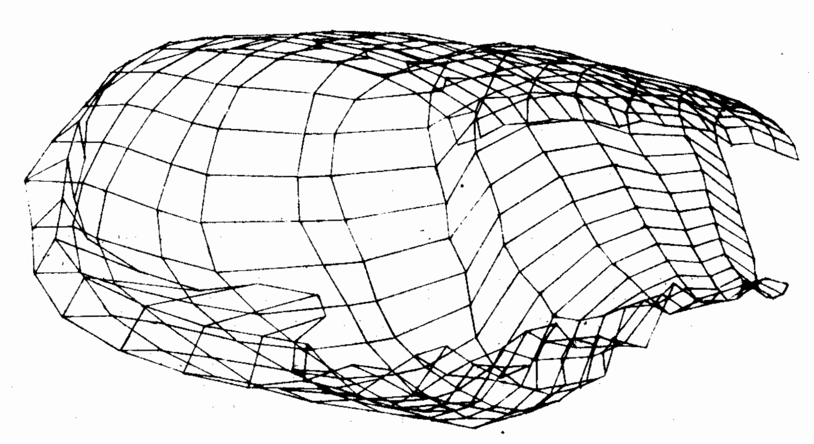


图3 计算机绘制的左半脑透视图

Fig. 3 A perspective projection drawing of the left brain made after pretreatment data by CAG.

三维重建的数学模型

树鼩脑外形形状复杂、曲率变化极不均匀，作者采用以变差减小为主要特征的B样条曲面算法实现计算机三维重建。

B样条曲面方程为

$$S_{n,m}(u,w)=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,n}(u)N_{j,m}(w)V_i^j \quad (0\leqslant u\leqslant 1,\ 0\leqslant w\leqslant 1) \tag{10}$$

当n = m = 3时，为双三次B样条曲面表达式：

$$S_{3,3}(u,w)=\sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}N_{i,3}(u)N_{j,3}(w)V_i^j \quad (0\leqslant u\leqslant 1,\ 0\leqslant w\leqslant 1) \tag{11}$$

式（10）、(11)中，V_i^j 为特征网格顶点坐标。根据切片数据点所构成的随机数据结构经优化后，用反算特征多边形顶点的算法求出V_i^j。

计算机重建的三维图形

作者在国产 DJS—21电子计算机上采用上述方法重建了树鼩左半脑外形曲面的三维结构，并在日本武滕(MUTOH)公司生产的 7062 RIS 6015V 型精密数控绘图机上绘制图形。图 2 是重建后的正投影图，图 3 是未加密点的透视图形。图4、图5是视点分别为（100，50，30）和（100，50，－50）的透视图形。透视图形象地反映出三维重建的定性结果。

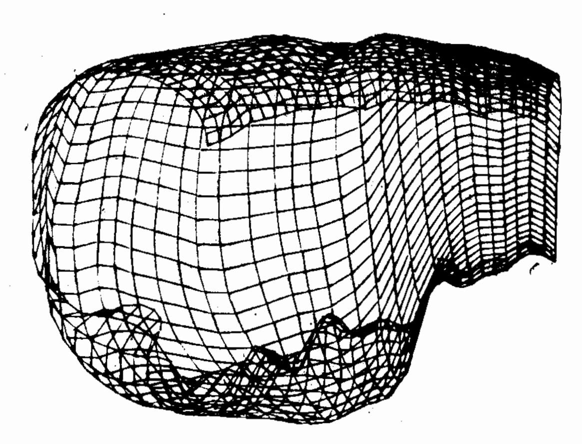


图 4　计算机绘制的视点为（100，50，30）的透视图

Fig. 4　A perspective projection drawing with the observation point　(100, 50, 30) by CAG.

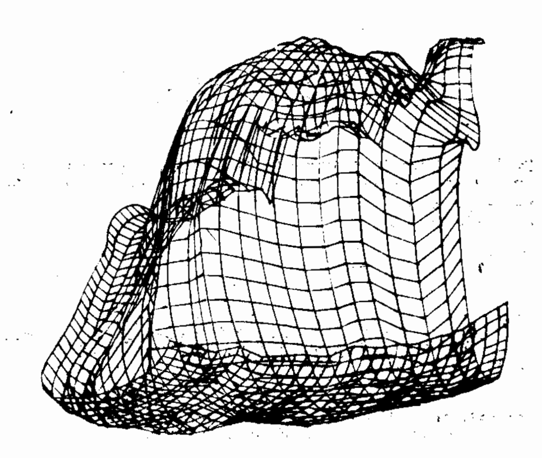


图5　计算机绘制的视点为（100，50，－50）的透视图
Fig. 5　A perspective projection drawing with the observation point　(100, 50, -50)　by CAG.

结　　论

从以上结果不难看出，本文报告的数学模型已成功地重建了脑外形的三维图形。利用该模型程序，并可对重建图形进行旋转、轴测、透视等变换；同时，可进行插值点计算、剖切计算、面积计算、体积计算等若干定量分析，及其脑立体的仿真模型的数控铣切。

上述技术的建立，具有重要的生理学研究价值：可利用同一软件，针对不同的研究对象作三维重建，其对象可大到人体外形或肢体，小到一个脑核团、一个神经元，甚至某些突触或树突分支；并可随意改变角度去探测研究目标。比如，若一旦建立起脑内若干核团的三维图形，则可按不同实验研究或临床应用目的，将观测目标准确置于所需位置或角度去操作。这样，在脑研究或神经外科手术时，则有可能摆脱脑立体定位仪的严格束缚，将手术对象置于所需位置，测定脑内某些核团的空间定位，施行脑定位毁损术或插入引导电极、导管等；利用计算机重建技术，并可对研究对象进行若干定量分析，这也是传统方法望尘莫及的；而且计算机绘图的快速、精确、易于线性变换的优点已为本文图示所证实。

需要说明的是，该三维重建软件的交互式功能有待健全，定量分析部分正在充实，以便在微型电子计算机上推广使用。

参 考 文 献

许鹿希　1984　电子计算机立体重建、展示和分析猕猴丘脑核团　解剖学通报　7(1)：1—7

陈俊强　1984　微计算机在形态研究中的一些应用　解剖学通报　7(3)：257—265

陈俊强等　1985　连续切片中神经元的计算机辅助三维重构　中国生物医学工程学报　4(2)：63—70

孙公铎等　1984　记录清醒树鼩 (*Tupaia belongeri chinensis*) 神经元单位活动的慢性微电极方法　动物学研究　5(4)：63—66.

蔡景霞、孙公铎等　1984　清醒树鼩 (*Tupaia belongeri chinensis*)　背侧海马神经元单位活动的观察　动物学研究　5(4)：57—62.

蔡景霞、孙公铎等　1984　不同照度下树鼩、懒猴和恒河猴的视觉辨别能力　动物学研究　5(4)：51—56.

马原野、孙公铎等　1985　LSD 对树鼩行为和背侧海马单位放电的影响　中国生理学会1985年学术年会（成都）论文摘要　P.44

汪多江、孙公铎等　1984　脑三维结构重建的研究　Ⅰ.脑切片图象的计算机处理　生理心理学第三届学术讨论会（苏州）论文集　P.75—77.

李绪明、孙公铎等　1986　树鼩脑三维结构重建的研究　Ⅱ.树鼩海马、尾核、隔区与中央灰质的立体定位的研究　贵阳医学院学报　11(2)：168.

汪多江、孙公铎等　1986　鼩树脑三维结构重建的研究　Ⅰ. 脑切片图象的计算机辅助绘图　动物学研究　7(3)：217—222.

Levinthal, C. 1972 *Nature*. 236：207—210.

Levinthal, C. *et al*., 1974 Computer Aided Reconstruction from Serial Section. FASEB. Bethesda

Wann, DF. *et al*., 1973 An On-Line Digital Computer System for the Semiautomatic Analysis of Golgi-Impregnated Neurons, IEEE Transactions on Biomedical Engineering. BME—20：233—247.

Yelnik, J. *et al*., 1981 A Computer Aided Method for the Quantitative Analysis of Dendritic Arborizations Reconstructed from serial Section. *J. Neuroscience Method*. 4：347—364.

Ware, R. W. *et al*., 1975 Three-Dimensional Reconstruction from Serial Section. *Int. Rev. Cytol*. 40：325—440.

Stevens, J. K. *et al*., 1980 *Brain Res. Rev*. 2：265—293.

Foote, S. L. *et al*., 1980 Accurate Three-dimensional reconstruction of neuronal distributions in the brain：reconstruction of the rat nucleus locus coeruleus. *J. J. Neurosci. Meth*. 3：159—173.

Lydic, R. *et al*., 1982 Three-Dimensional Structure of the Mammalian Suprachiasmatic Nuclei：A Comparative Study of five Species. *J. Comp. Neurol*. 204：225—237

Riesenfeld, R.F.1972 Applicatons of B-Spline Approximation to Geometric problems of Computer Aided Design. PH. D. Thesis at Syracuse University. Published as University of Utah. UTEC-CSs. 73—126

A STUDY ON THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF BRAIN STRUCTURE OF THE TREE SEREW (*TUPAIA BELONGERI CHINENSIS*)

Ⅲ. THE SOLID FIGURES OF THE BRAIN BY COMPUTER AIDED GRAPHICS

Wang Duojiang *et al.*

(*Guizhou Province Yunma Factory*)

In the article, a technique for bi-dimensional reconstruction and the picture of brain slice made by computer had been reported.

In this article, the methods described by the article were developed, a mathematical model for three-dimensional reconstruction of brain structure was built, a basic technique and some examples set up by Computer Aided Graphics were presented.

Key words: Tree Shrew, Three-dimensional reconstruction of brain structure, Computer